تحلیل دینامیکی اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های بتنی به روش المان محدود★

محمد حسین امین‌فر[۱]   بهمن فرهمند آذر[۲]   هادی صفری[۳]   مرتضی بیک لریان[٤]

چکیده *در عمل، سازه بر لایه‌های خاک انعطاف‌پذیر واقع شده است. بنابراین خاک نیز باید بمانند سازه مدل شود. یک سازه با تکیه‌گاه صلب، و یک سازه با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر از این لحاظ با یکدیگر اختلاف دارند که ممکن است قسمت اصلی انرژی ارتعاشی به‌وسیله‌ی تشعشع امواج و نیز توسط عمل هیسترزیس در خاک مستهلک شود. در آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ خاک زیر سازه صلب فرض شده است و از اثرات اندرکنش خاک - سازه صرف نظر شده است. در این تحقیق سعی شده تا تأثیر اندرکنش خاک - سازه بر پاسخ‌های ارتعاشی برای قاب‌های خمشی بتنی بررسی شود و روشی بر پایه‌ی المان‌های محدود مطابق با ضوابط و پارامترهای آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ارائه شود. دقت روش ارائه‌شده با چهار روش دیگر مراجع مقایسه شده است. نتایج حاصل از تاریخچه‌ی زمانی و تحلیل مودال بر روی سیستم‌های معرفی‌شده در نمودارها و جداول ارائه شده است.*

واژه‌های کلیدی اندر کنش خاک–سازه، تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر، تکیه‌گاه صلب، پاسخ ارتعاشی سازه، روش المان محدود.

Dynamic Soil – Structure Interaction Analysis of Concrete Structures by Using Finite Elements Method

M. H. Aminfar   B. Farahmand   H. Safari   M. Biklaryan

Abstract *In practice, foundations are settled on the soft layers of soil, so the ground must be designed as well as the structure. Wave propagation and hysteresis damping of soil layers may alter the seismic response of flexible-base design in comparison to controversial fixed-base. Lots of uncertainties about this issue, necessitate most of seismic design standards including Iranian standard No. 2800 to neglect the soil – structure interaction (SSI) effects on seismic response of structures. A simplified finite elements method is proposed in this research and applied according to the Standard No. 2800 criteria on reinforced concrete structures. The accuracy and efficiency of this method is compared with four other similar researches, and the results of time history and modal analyses for descriptive reinforced concrete systems are ilusterated in the form of figurs and charts.*

Key Words Soil-Structure Interaction, Flexible-Base, Fixed-Base, Seismic Responses, Finite Elements Method

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۲/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۷/۱۲ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.

(۲)دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.

(۳)دانشجوی دکتری عمران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه محقق اردبیلی.

(٤)دانشجوی دکتری عمران، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.

مقدمه

اندرکنش خاک و سازه مسألهی بسیار مهمی است خصوصاً برای سازههای سنگین و سخت که بر زمینهای انعطاف پذیر ساخته شدهاند. این مسأله پاسخهای سازه را تا حد قابل توجهی تغییر میدهد. بنابراین تأثیرات این اندرکنش باید در پاسخهای دینامیکی سازه در نظر گرفته شود [1]. موضوع تحلیل و طراحی سازهها در برابر زلزله در مطالعات زیادی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. در هنگام وقوع زلزله رفتار خاک زیر سازه نقش مهمی در پاسخ سازه ایفا میکند. در اغلب موارد، خاک مدل نمیشود و از تأثیرات مهم آن صرف نظر میشود. به علت نامحدود بودن محیط خاک، مدلسازی آن پیچیدگی بیشتری نسبت به مدل سازی سازه دارد. در سازههایی که تحت تأثیر زلزله قرار گرفتهاند علاوه بر نیروهای دینامیکی وارد و تنشهای ناشی از آن در سازه، پارامتر زمین و خاک به عبارت بهتر رفتار متقابل خاک و سازه، نقش انکارناپذیری بر عهده دارد و رفتار سیستم را به مقدار قابلتوجهی تحت تأثیر قرار میدهد. این امر باعث گردیده که این موضوع در سالهای اخیر مورد توجه محققان زیادی قرار گیرد. در سال ۱۹٦۷ میلادی، وایتمن و ریچاردنیم فضای الاستیک زیر سازه را بهصورت یک جرم متمرکز و فنر مدل کردند و در این مدل، فنرها و میراگرهای درنظر گرفتهشده، مستقل از محتوای فرکانسی بار بودند [2]. در سال ۱۹۷۵ میلادی، کاسل و روزتروشی بر پایهی المان محدود بود را بیان کردند [4]. این روش در سال ۱۹۷۵ میلادی، توسط سید و لایسمر مورد مطالعه بیشتر قرار گرفت و المانهای مرزی مختلفی برای این روش بیان کردند [5]. در سال ۲۰۰۰ میلادی، رودریگوز و مونتز با تعیین پارامترهای موجود در سیستم یک درجه آزادی ارائهشده در آییننامهی ATC3-06 برای سازه های متداول در مکزیک و با در نظر گرفتن شرایط خاک منطقه، اثر اندر کنش را بر رفتار غیر خطی سازه بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که با اصلاح پریود سازه میتوان اثرات اندر کنش خاک-سازه را در نظر گرفت[9]. در سال ۲۰۰۷ میلادی، هونگ و همکارانش در ادامهی تحقیقات در زمینهی مدلهای المان محدود بهمنظور مدل کردن ناحیهی دور خاک از المانهای ویسکوز استفاده کردند و تلاش کردند تا خصوصیات غیر خطی خاک را در مدل خود اعمال کنند [18]. مطالعات در زمینهی المانهای مرزی در روش المانهای محدود مورد توجه محققان بسیاری میباشد.

در سال ۲۰۰۱ میلادی، یرلی و تانریکولو روش مختلط المانهای محدود و المانهای نامحدود و روش المانهای مرزی را ارائه کردند که در این تحقیق برای بررسی دقت مدل خاک پیشنهادی بکار رفته است [10,11,14]. در سال ۲۰۰٤ ولف مدل مخروطی یا Cone را برای مدل کردن خاک زیر سازه استفاده کرد در این تحقیق برای بررسی میزان دقت مدل خاک ارائه شده بههمراه سازه از آن استفاده شده است [15,20]. در سال ۲۰۰٤ میلادی، حسینزاده و ناطقی مطالعات آزمایشگاهی بهمنظور بررسی تأثیرات اندرکنش خاک و سازه بر مدل آزمایشگاهی خود انجام دادند که در این تحقیق سعی شده است از نتایج و پارامتر های بهکار گرفتهشده در آن استفاده شود [16]. در سال ۲۰۰۹ میلادی، ناصر مطالعات خود را در زمینهی تأثیرات اندر کنش خاک و سازه بر قابهای بتنآرمه انجام داده است [20].

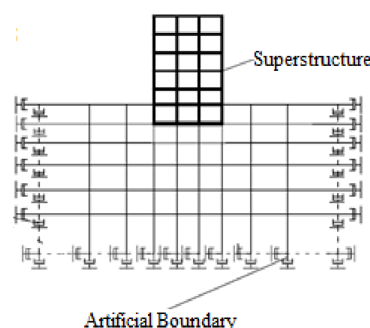
در این مطالعه سعی شده است تا با استفاده از المانهای فنر و میراگر وایتمن و ریچارد که بهصورت یک جرم متمرکز و فنر در زیر سازه مدل میشود و با استفاده از روش المانهای محدود که مورد توجه بسیاری از محققان میباشد مدل ترکیبی اصلاح شدهای برای بررسی تأثیرات اندرکنش خاک و سازه ارائه شود. در ادامه تلاش شدهاست میزان تأثیرات اندرکنش خاک و سازه بر سازههای بتنی واقع بر روی پیهای سطحی مطابق با ضوابط و پارامترهای

آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ بررسی شود.

مدل خاک و سازه برای در نظر گرفتن اندر کنش خاک– سازه

یک مدل خاک در صورتی بـه شـرایط طبیعـی نزدیـک می‌باشد کـه در آن سـختی‌هـای خـاک، میرایـی مـاده، میرایی تشعشـعی، کـرنش‌هـای غیـرخطـی و تغییـرات خواص خاک در نظر گرفتـه شـود. روش‌هـای تحلیـل اندرکنش خاک–سازه بـه سـه دسـته‌ی روش مسـتقیم، روش زیرسازه و روش مخـتلط تقسـیم مـی‌شـوند. در روش مستقیم، پاسـخ سیسـتم خـاک – سـازه بـه‌طـور هم‌زمان با تحلیل سیستم خاک – سازه در یک گـام بـه دست می‌آید. روش المان محدود نمونه‌ای از این روش می‌باشد. در حالاتی که امکان مـدل کـردن خـاک زیـر سازه به‌صورت المان محدود وجود نداشته باشد روش زیر سازه به کار می‌رود. در این روش اثر خاک بر سازه به‌وسیله‌ی یک سری فنر و میراگر تعریف می‌گردد کـه مشخصات آن‌ها به‌صورت تابعی از فرکـانس ارتعاشـی معرفی می‌گردد. مهم‌ترین مزیت این روش، عـدم مـدل کردن لایه های خاک می‌باشد که حجم عملیـات را بـه مقدار زیـادی کـاهش مـی‌دهـد، امـا ایـن روش دارای محدودیت‌هایی است که کارایی آن را کاهش می‌دهـد. فرض اصلی این روش، برقراری اصل برهـم‌نهـی اسـت که متضمن رفتار خطی است. در این روش مجموعـه‌ی خاک–سازه به دو بخش خاک به‌علاوه‌ی سـازه تقسـیم می‌گردد که هر کدام به‌صورت جداگانه حل می‌شـود و در مرحله‌ی نهایی تحلیل، بر اساس اصـل بـرهـم‌نهـی، نتایج تحلیل‌ها با همدیگر ترکیب می‌شـوند. ایـن روش بـه‌خصـوص در مـواقعی کـه سیسـتم دارای هندسـه‌ی پیچیده می‌باشد کاربرد کم‌تـری دارد. در روش مخـتلط محیط به دو زیر سازه موسوم به میدان نزدیک، که سازه و محـدوده‌ی مشخصـی از خـاک اطـراف آن را در بـر می‌گیـرد و میـدان دور، کـه باقیمانـده‌ی محـیط خـاک نیمه‌بینهایت را شامل می‌شود، تقسیم می‌گـردد. در ایـن روش مقادیر تنش و تغییر مکان ابتدا در موقعیت سطح تماس در میدان دور محاسبه می‌شوند، سپس به‌صورت نیرو در تحلیل اجـزای محـدود میـدان نزدیـک اعمـال می‌شوند. عدم کارایی این روش، یافتن راه حلـی بـرای مسـألـه‌ی پراکنـدگی امـواج در میـدان نزدیـک و دور می‌باشد [12].

در مواردی که لایه بندی خاک در جهـات افقـی و عمودی قرار گرفته و بررسی رفتار غیر خطی خـاک در تحلیل اندر کنش ضروری باشد، اسـتفاده از مـدل نـیم بی‌نهایت ارتجاعی امکان‌پـذیر نیسـت و بایـد از روش عناصر محدود اسـتفاده شـود. در ایـن روش مـی‌تـوان علاوه بر در نظر گرفتن میرایی هندسی، مشابه مدل نیم بی‌نهایت ارتجاعی، مدفون‌شدگی پی و لایه‌بندی خـاک در جهات افقی و عمودی را به‌راحتی در تحلیل دخالت داد. گرچه امکان تحلیل سـه‌بعـدی نیـز در ایـن روش امکان پذیر است، لیکن به‌علت حجم بالای محاسـباتی ایـن روش، آن را بـه‌صـورت مـدل دوبعـدی معـادل شبیه‌سازی می‌کنند شکل (۱). خصوصیات گره‌ها روی این مرزها که مرز اندر کنش نامیده می‌شـوند نمایـانگر خصوصیات مهم دامنه‌ی نامحـدود خـاک در خـارج از این مرزها می‌باشند. برای مثال در یک تحلیـل دامنـه‌ی فرکـانس، خصوصـیات سـختی دینـامیکی مربـوط بـه گره‌های این مرز اندر کنش، بیانگر رفتار خاک نامحدود می‌باشد. رفتار خـاک نامحـدود همیشـه خطـی فـرض می‌شود. موقعیت این مرز اختیاری است کـه مـی‌توانـد نزدیک و یا دور در نظر گرفته شود. اگر مرز اندر کنش برای مدل کردن خاک به انـدازه‌ی کـافی دور از سـازه انتخـاب شـود بـه آن مـرز مصـنوعی مـی‌گوینـد. ایـن مرزهـای مصـنوعی بایـد طـوری انتخـاب شـوند کـه انعکاس موج نداشته و به انـدازه‌ی کـافی دور از سـازه باشند تا اثرات خاک در تحلیل دینامیکی مد نظـر قـرار گیرند. به این روش مـدل کـردن خـاک روش مسـتقیم می‌گویند. اگر این مرز در نزدیک سـازه انتخـاب شـود می‌توان از روش زیر سازه که یکی از مدل‌های مخـتلط است استفاده کرد.



شکل ۱ مدل دو بعدی خاک در روش المان محدود

جدول ۱ مشخصات مصالح فولادی و بتنی قاب‌های بتنی مورد بررسی

نوع مصالح	تنش تسلیم kg/cm^2	مدول الاستیسیته kg/cm^2	ضریب پواسون
فولاد	۲۸۰۰	۲/۰۱×۱۰^۶	۰/۳
بتن	۲۱۰	۲/۰۱×۱۰^۵	۰/۲

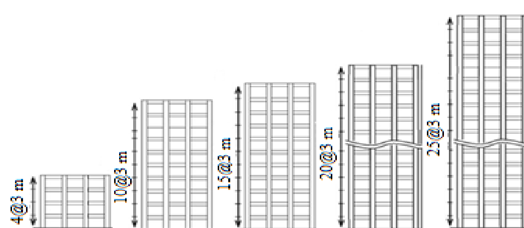
مشخصات سازه‌های مورد بررسی

برای طراحی قاب‌های بتنی مسطح ، مشخصات مصالح برابر مقادیر جدول (۱) فرض شده است:

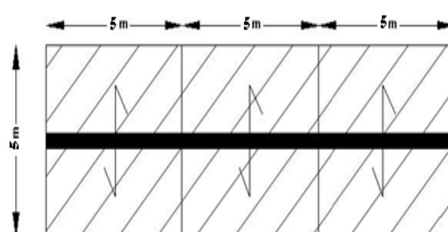
در این مطالعه به بررسی سازه‌های بتنی با قاب خمشی متوسط پرداخته شده است و سعی شده از سازه‌های با ارتفاع کم، متوسط و زیاد در مدل‌ها استفاده شود. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، سازه‌های مورد مطالعه شامل ۵ مدل می‌باشند که این مدل‌ها دارای تعداد طبقات ٤، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ می‌باشند. قاب‌ها به‌صورت دوبعدی مدل‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. ارتفاع طبقات این سازه‌ها ۳ متر می‌باشد و این مدل‌ها به‌صورت قاب بتن‌آرمه با سیستم قاب خمشی متوسط آیین‌نامه زلزله ۲۸۰۰ ایران طراحی شده‌اند. دهانه‌ی قاب‌ها ۵ متر انتخاب شده‌است و در جهت عرضی، قاب‌ها به اندازه‌ی ۵ متر از هم فاصله دارند. سیستم سقف به‌صورت تیرچه بلوک است و جهت تیرریزی سقف‌ها به صورت شکل (۳) می‌باشد. بار مرده‌ی گسترده‌ی کف را ۶۰۰ kg/m^2 و بار زنده‌ی طبقات و بام طبق آیین‌نامه ایران ۲۰۰kg/m^2 در نظر گرفته شده است. به‌علاوه وزن خود تیرها و ستون‌ها با توجه به وزن مخصوص مصالح به‌کار رفته (بتن و آرماتور) در نرم‌افزارهای مورد استفاده قابل محاسبه می‌باشند که به‌صورت بار مرده به بارهای فوق اضافه می‌شوند.

مشخصات سیستم خاک مورد بررسی

در جدول (۲) مشخصات چهار نوع خاک مورد مطالعه در این تحقیق برای چهار گروه مختلف خاک در آیین‌نامه‌ی ایران ارائه شده است [17].



شکل ۲ مدل سازه‌های منظم



شکل ۳ پلان تیپ سقف طبقات

جدول ۲ مشخصات خاک‌های مورد مطالعه

خاک	Vs(m/s)	توصیف آیین‌نامه	ν	$G(N/m^2)$	$r(Kg/m^3)$	(N/m^2)
I	۱٤۰۰	سنگ‌های رسوبی سخت و مقاوم، سنگ‌های آذرین	۰/۳	٤٣١٢×١٠^{٦}	۲۲۰۰	$١/١٢١\times ١٠^{١٠}$
II	٦۰۰	سنگ‌های آذرین سست، سنگ‌های سست رسوبی و سنگ‌های دگرگونی متورق	۰/۳۵	٧٩٢×١٠^{٦}	۲۲۰۰	$٢/١٨٤\times ١٠^{٩}$
III	۳۰۰	سنگ‌های متلاشی شده بر اثر هوازدگی، خاک‌های با تراکم متوسط	۰/۳۵	١٩٨×١٠^{٦}	۲۲۰۰	$٥/٣٤٦\times ١٠^{٨}$
IV	۱۵۰	نهشته‌های نرم با رطوبت زیاد	۰/٤	$٤٩/٥\times ١٠^{٦}$	۲۲۰۰	$١/٣٨٦\times ١٠^{٨}$

به‌منظور مدل کردن سیستم خاک زیر سازه از روش المان محدود که یکی از روش‌های دقیق و پیچیده نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد استفاده شده است. بدین منظور خاک زیر سازه به دو قسمت میدان نزدیک و میدان دور تقسیم شده است. ناحیه‌ی نزدیک شامل ناحیه‌ی محدود خاک زیر سازه و میدان دور شامل یک صفحه نیمه بی‌نهایت می‌باشد. ناحیه‌ی نزدیک خاک به‌صورت المان محدود مدل شده است که شامل خاک زیر سازه به عمق ۳۰ متر و به عرض ٦۵ متر از هر طرف سازه که مانند قاب به‌صورت دوبعدی مدل می‌شود و چون خاک در خارج از صفحه نامحدود می‌باشد، ناحیه‌ی نزدیک خاک به‌صورت کرنش مسطح مدل می‌شود [8]. هر کدام از المان‌های کرنش مسطح درنظر گرفته‌شده در مدل دارای ٤ گره در گوشه‌ها و هر گره شامل دو درجه‌ی آزادی انتقالی می‌باشد. پی ساختمان به‌صورت گسترده و صلب در نظر گرفته شده‌است و به‌صورت المان تیر صلب در محل اتصال خاک به زیر سازه مدل می‌شود و در محل اتصال این المان‌ها به خاک به منظور شبیه‌سازی رفتار خاک در تماس با سازه از المان‌های فقط فشاری استفاده شده است که از انتقال نیروی کششی سازه به خاک جلوگیری می‌کنند. برای مدل کردن ناحیه‌ی دور که به صورت نیمه بی‌نهایت است در طرفین ناحیه‌ی نزدیک خاک از مدل فنر و کمک‌فنر استفاده می‌شود که به گره‌های المان‌های مرزی وصل می‌شود. این کار با تعبیه کمک فنرها و فنرهایی در گره‌های دو مرز جانبی ناحیه‌ی نزدیک خاک انجام می‌گیرد. برای محاسبه‌ی سختی فنرها و میرایی کمک فنرها که در مرز ناحیه‌ی دور و نزدیک خاک قرار گرفته‌اند از روابط ارائه‌شده توسط وایتمن و ریچارد استفاده می‌شود [2].

$$K_x = \frac{G\beta_z\sqrt{BL}\eta_v}{1-\vartheta} \quad (۱)$$

$$K_y = 2(1+\vartheta)G\beta_x\sqrt{BL}\eta_h \quad (۲)$$

$$K_\theta = G\beta_\phi BL^2\eta_f/(1-\vartheta) \quad (۳)$$

که در آن‌ها، ϑ ضریب پواسون، G مدول برشی خاک، L,B ابعاد مقطع مستطیل شکل پی، ضرایب $\beta_\phi, \beta_Z, \beta_X$ و ضرایب η_h, η_v, η_f که متأثر از عمق پی می‌باشند از منحنی‌ها و جداول مرجع به دست می‌آیند.

وایتمن با توجه به تأثیر میرایی هندسی و میرائی داخلی، روابط زیر را برای تعیین ضرایب میرائی کل معادل پیشنهاد می‌نماید. رابطه‌ی (٤) برای درجه‌ی آزادی انتقال قائم، رابطه‌ی (۵) برای درجه‌ی آزادی انتقال افقی و رابطه‌ی (٦) برای درجه‌ی آزادی خمشی:

$$\zeta_t = 0.49\left(\frac{M}{\rho r_0^3}\right)^{-0.5} \quad (٤)$$

$$\zeta_t = 0.31(M/\rho r_0^3)^{-0.5} \quad (۵)$$

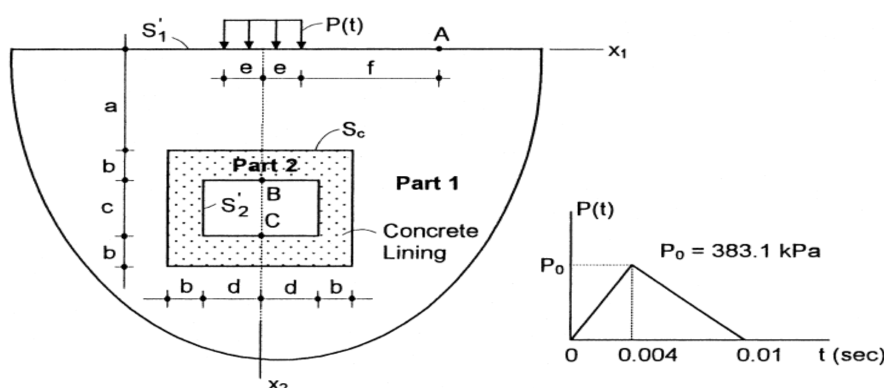
$$\zeta_t = 0.05 + 0.1(I_\phi/\rho r_0^5)^{0.5}[1 + (I_\phi/4\rho r_0^5)]^{-1} \quad (٦)$$

در این روابط ρ چگالی خاک، r_0 شعاع مؤثر پی، M جرم کل سازه و I_ϕ ممان اینرسی کل سازه می‌باشد.

برای محاسبه‌ی سختی و میرایی المان‌های مرزی، طبق روابط ارائه‌شده‌ی فوق، ناحیه‌ی مرزی سهم هر گره به‌صورت یک پی مستطیلی درنظر گرفته می‌شود که فنرها و کمک‌فنرهای تعبیه‌شده در هر گره بر آن عمود هستند.

بررسی صحت مدل خاک در نظر گرفته شده در زیر سازه

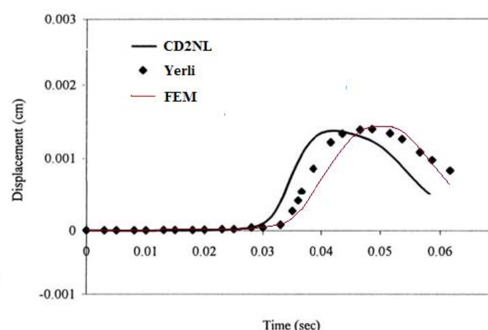
در این مرحله نتایج به‌دست آمده از روش‌های ارائه شده توسط Tanrikulu و Yerli برای مدل نشان داده‌شده در شکل (٤) با مشخصات ذکرشده در جدول (۳)، با نتایج حاصل از روش FEM پیشنهادشده در این تحقیق، مقایسه گردید. یرلی از روش ترکیبی المان محدود و المان‌های نامحدود و تانریکولو از روش المان‌های مرزی برای مدل‌سازی این سیستم استفاده کردند [10,11]. همان‌گونه که در شکل (٤) نشان داده شده است، پی واقع بر یک نیم فضای خاک به صورت صلب فرض شده است و در اشکال (٦ و ۵) تغییر مکان‌های قائم نقاط B و C به‌دست‌آمده از روش‌های ذکرشده ارائه گردید و مشاهده شد که مدل پیشنهادی این تحقیق FEM با دیگر مدل‌ها مطابقت خوبی دارد.



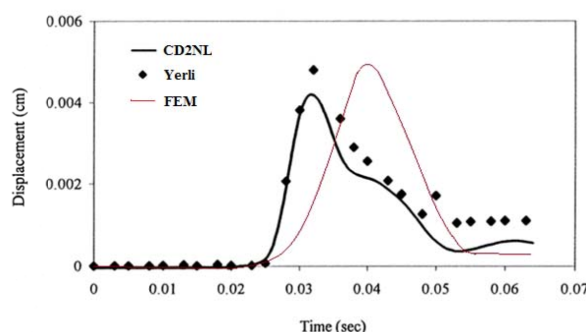
شکل ٤ نیم فضای خاک مورد بررسی و نمودار توزیع بار

جدول ۳ مشخصات خاک نیم فضا و بتن مصرفی

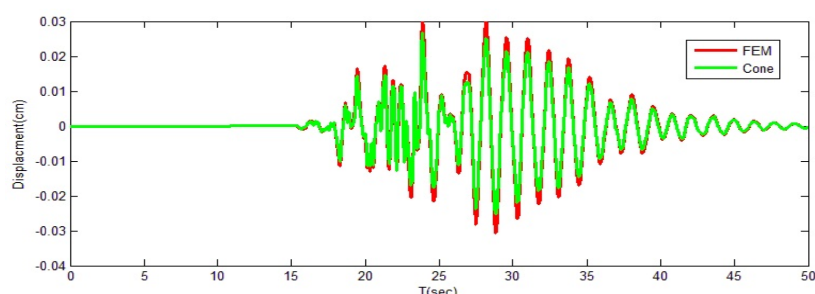
مشخصات	بتن	نیم فضا
مدول برشی	$G= ۱۰٦۲۲\times۱۰^{٦} N/m^2$	$G= ٤۷۰/۲٤\times۱۰^{٦} N/m^2$
نسبت پواسون	ν=۰/۱۷	ν=۰/۱
چگالی	$۲۲٦۳ Kg/m^3$	$۲۰٤۸ Kg/m^3$
نسبت میرایی هندسی	ξ=۰/۰۵	ξ=۰/۰۵
مدول الاستیسیته	$E=۲/٤۸۵\times۱۰^{۱۰}$	$E=۱۰/۳٤۵\times۱۰^{۸}$



شکل ٥ تغییر مکان قائم در نقطه‌ی C



شکل ٦ تغییر مکان قائم در نقطه‌ی B



شکل ۷ نمودار تغییر مکان بام برای دو مدل Cone و FEM پیشنهادی در تحلیل تاریخچه زمانی برای سازه‌ی ۱۰ طبقه

در ادامه، مدل المان محدود ارائه‌شده با مدل Cone که توسط ولف برای اعمال تأثیر اندر کنش خاک و سازه ارائه شده است، مورد مقایسه قرار می‌گیرد [15,20]. با استفاده از مدل ولف سختی‌ها و میرایی‌های فنرها و کمک‌فنرهای قائم، افقی، دورانی و پیچشی را در فرکانس‌های مختلف پیدا می‌کنیم. از آن‌جا که تحلیل مورد بررسی ما در حوزه‌ی زمان می‌باشد، بنابراین سختی و میرایی را فقط در فرکانس اصلی سازه که بیش‌ترین نقش را در اندر کنش خاک و سازه دارد انتخاب می‌کنیم. نوع تحلیل، تحلیل هایمودال و دینامیکی تاریخچه زمانی است که تحت بار زلزله نورتریج می‌باشد. سازه‌های انتخابی، سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه، قاب خمشی بتنی متوسط با مشخصات سازه‌ای و بارگزاری معرفی‌شده در بخش قبل می‌باشند. مشخصات خاک تعریف‌شده در جدول (٤) آورده شده است.

جدول ٤ مشخصات خاک تعریف شده

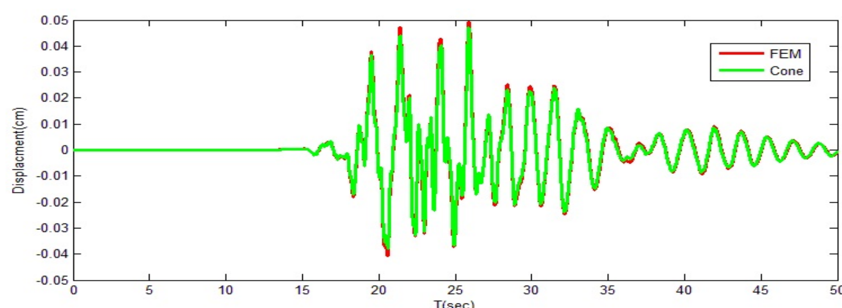
r(Kg/m³)	G (N/m²)	E(N/m²)	ν	ξ
۲۲۰۰	۷۹۲×۱۰٦	۲/۱۳۸×۱۰٦	۰/۳٥	۰/۰٥

نتایج حاصل از تحلیل مودال و تحلیل تاریخچه زمانی بر این دو مدل در جدول (٥) ارائه شده است.

جدول ٥ نتایج پاسخ سازه در دو نوع مدل Cone و FEM

تعداد طبقه	مدل	پریود اصلی سازه (Sec)	تغییر مکان ماکزیمم بام (cm)	برش ماکزیمم پایه (N)
۱۰	FEM	۱/۳۹۳	۳/۰۱	٥۲۹۷۷۷
	Cone	۱/۳۹٦	۲/٦۸	٥۳۸٤۳۷
۱٥	FEM	۱/٦۹۳	٤/۹۲	٥۹۲۳٥٤
	Cone	۱/۷۰۳	٤/۷۱	٦۱۱۳٤۸

نمودار تغییر مکان بام برای دو مدل Cone و FEM پیشنهادی، برای قاب ده طبقه در شکل (۷) و برای قاب پانزده طبقه در شکل (۸) ارائه شده است.



شکل ٨ نمودار تغییر مکان بام برای دو مدلCone و FEM پیشنهادی در تحلیل تاریخچه زمانی برای سازه‌ی ١٥ طبقه

جدول ٦ پریود اصلی سازه‌ها در دو حالت با تأثیر اندر کنش خاک – سازه و بدون آن

تناوب اصلی پایه صلب T	زمان تناوب اصلی پایه انعطاف پذیر $\bar{T}$				تعداد طبقات
	نوع خاک				
	IV	III	II	I	
٠/٥٥٦	٠/٥٨٦	٠/٥٦٣	٠/٥٥٦	٠/٥٥٥	٤
١/٣٨٨	١/٤٧٨	١/٤١٢	١/٣٩٣	١/٣٨٩	١٠
١/٦٨٤	١/٨٩٧	١/٧٣٩	١/٦٩٣	١/٦٨٠	١٥
٢/٣٤٣	٢/٦٧٩	٢/٤٣٤	١/٣٦١	٢/٣٤١	٢٠
٢/٩٧١	٣/٤٦٩	٣/١١٠	٣/٠٠٢	٢/٩٧٣	٢٥

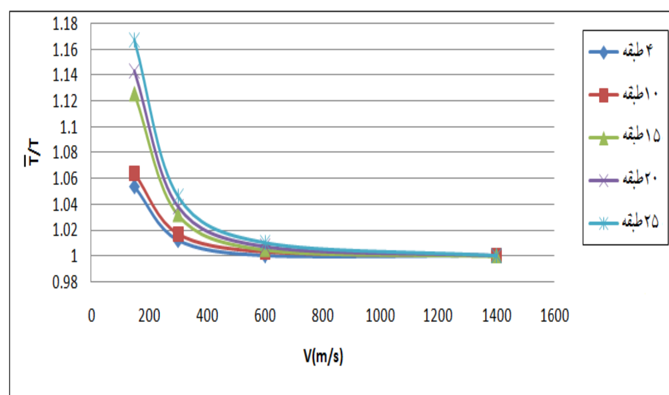
همانگونه که در شکلهای (٧ و ٨) مشاهده می‌گردد با توجه به نتایج حاصل از دو مدل و نتایج حاصل از مدل‌های ارائه‌شده در مثال قبل مدل المان محدود پیشنهادشده نتایج خوبی از اعمال تأثیرات اندر کنش خاک و سازه بر پاسخ‌های ارتعاشی سازه ارائه می‌دهد.

تحلیل مودال و دینامیکی تاریخچه زمانی سازه‌های معرفی شده

در این قسمت، ابتدا به بررسی تأثیرات اندر کنش خاک–سازه در زمان تناوب و شکل مودی سیستم‌های مورد مطالعه پرداخته شد و سپس مقادیر زمان تناوب سیستم‌ها با مقادیر به‌دست آمده طبق آیین نامه‌ی NEHRP مقایسه گردید [13]. هم‌چنین این سیستم‌ها، به روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحت ٣ شتاب نگاشت معرفی‌شده در جدول (٩) تحلیل شدند. سپس نسبت زمان تناوب اصلی، برش پایه و تغییر مکان سیستم‌های با تأثیر اندر کنش خاک–سازه به مقادیر متناظر سیستم‌های بدون تأثیر اندر کنش خاک–سازه محاسبه و منحنی‌های مربوط به آن‌ها رسم گردید.

بررسی زمان تناوب اصلی سازه‌ها

به‌منظور مقایسه‌ی زمان تناوب اصلی سیستم‌های با تأثیر اندرکنش خاک–سازه و بدون آن، قاب‌های معرفی‌شده با فرض خاک صلب و خاک انعطاف‌پذیر برای چهار نوع خاک معرفی‌شده تحت آنالیز مودال قرار گرفتند. نسبت زمان تناوب سیستم خاک–سازه در هر نوع خاک به زمان تناوب سازه‌ی متناظر با پایه‌ی صلب محاسبه شد. نسبت‌های $\frac{\bar{T}}{T}$ برای هر نوع قاب و هر نوع خاک مطابق جدول (٦) محاسبه شد که در آن $\bar{T}$، زمان تناوب اصلی سیستم با تأثیر اندرکنش خاک–سازه و T، زمان تناوب اصلی سیستم بدون تأثیر اندرکنش خاک–سازه می‌باشد.



شکل ۹ نمودار نسبت‌های $\frac{\overline{T}}{T}$ برای خاک‌های معرفی شده در سرعت‌های موج برشی مختلف

نمودار نسبت‌های $\frac{\overline{T}}{T}$ برای خاک‌های مختلف نسبت به سرعت موج برشی آن‌ها در شکل (۹) نشان داده شده است. با مطالعه‌ی نتایج حاصل از تحلیل مودال ۲۰ سیستم معرفی‌شده در دو حالت با و بدون تأثیر اندرکنش خاک–سازه مشاهده می‌شود که با افزایش نرمی خاک و نیز با افزایش تعداد طبقات سازه (کاهش سختی سازه) تأثیرات اندر کنش خاک–سازه در پریود ارتعاشی سازه‌ها افزایش می‌یابد.

محاسبه‌ی پریود سازه در دو حالت با اندرکنش خاک و سازه و بدون آن به روش آیین نامه‌ی NHERP

مطابق با روابط آیین‌نامه‌ی NHERP به‌منظور اصلاح زمان تناوب سازه از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود.

$$\overline{T} = T\sqrt{1 + \frac{\overline{K}}{K_y}\left[1 + \frac{K_y \overline{h}^2}{K_\theta}\right]} \qquad (۷)$$

که در آن K_y سختی جانبی فونداسیون، K_θ سختی خمشی فونداسیون و $\overline{K}$ سختی مؤثر سازه در حالت پایه صلب برای سازه‌های مورد مطالعه می‌باشند و به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\overline{K} = 4\pi^2\left[\frac{\overline{W}}{gT^2}\right] = \omega^2\overline{M} \qquad (۸)$$

که در آن $\overline{M} = 0.7M$ جرم مؤثر سازه و $\overline{h} = 0.7h$ ارتفاع مؤثر سازه می‌باشد [2,13].

در جدول (۷) مقادیر $\overline{T}$ زمان تناوب سیستم‌ها بادر نظر گرفتن اندرکنش خاک–سازه براساس رابطه‌ی پیشنهادی آیین نامه‌ی NHERP و T زمان تناوب متناظر بدون در نظر گرفتن تأثیرات اندر کنش خاک–سازه ارائه گردید. نسبت‌های $\frac{\overline{T}}{T}$ نسبت به سرعت موج برشی خاک‌های مختلف برای تعداد طبقات مختلف در شکل (۱۰) ارائه شد.

با توجه به جدول (۷) و شکل (۱۰)، مشاهده می‌شود که مطابق آیین‌نامه‌ی NHERP با افزایش نرمی خاک و نیز با افزایش تعداد طبقات، مقدار $\frac{\overline{T}}{T}$ افزایش می‌یابد. با توجه به اشکال (۱۰ و ۹) مشاهده می‌شود که مطابقت خوبی بین نتایج حاصل از آنالیز مودال و آیین‌نامه‌ی NHERP برای این نسبت وجود دارد.

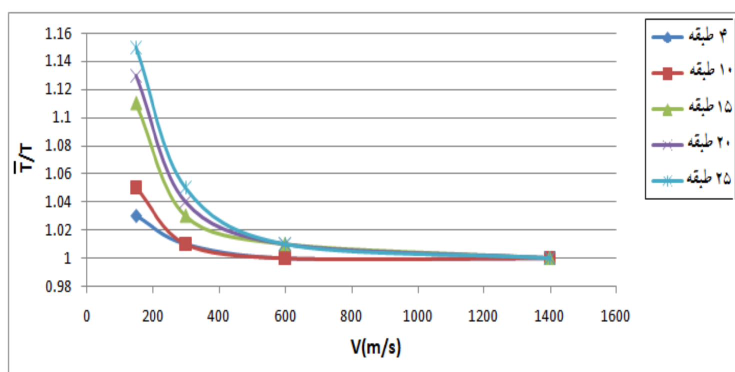
به‌منظور بررسی میزان تأثیرات اندرکنش خاک–سازه بر مودهای ارتعاشی بالاتر سازه آنالیز مودال انجام شد و مقادیر $\overline{T}$ و T محاسبه شد و به‌عنوان نمونه برای سازه‌ی ۱۵ طبقه در ۱۲ پریود اول در جدول (۸) ارائه گردید.

با توجه به نتایج جدول (۸) مشاهده می‌شود که تأثیرات اندرکنش خاک–سازه در برخی از مودهای بالاتر سازه قابل توجه می‌باشد. به‌طور مثال برای خاک نوع IV پریود سازه در مودهای ارتعاشی ۹ به بالا در حدود سه برابر افزایش پیدا کرده است ولی این افزایش برای مود اول همان خاک در حدود ۰/۱۲ می‌باشد و

این، اهمیت درنظر گرفتن مودهای بالای سازه در اندرکنش خاک–سازه را نشان می‌دهد. ولی در این تحقیق به دلیل این‌که از روش المان محدود استفاده شده است، مودهای ارتعاشی بالاتر نیز درنظر گرفته شده تا نتایج دقیق‌تری حاصل شود.

جدول ۷ پریودهای ناشی از دو حالت با اندرکنش خاک–سازه و بدون آن بر اساس روابط آیین‌نامه‌ی NHERP

تعداد طبقات	زمان تناوب اصلی پایه‌ی انعطاف‌پذیر $\bar{T}$				تناوب اصلی پایه صلب T
	نوع خاک				
	I	II	III	IV	
٤	۰/۵۵٦	۰/۵۵۷	۰/۵٦۰	۰/۵۷۰	۰/۵۵٦
۱۰	۱/۳۹۰	۱/۳۹۲	۱/٤۱۳	۱/٤۵٤	۱/۳۸۸
۱۵	۱/٦۱۹	۱/٦۹۳	۱/۷٤۲	۱/۸٦۲	۱/٦۸٤
۲۰	۲/۳۵۱	۲/۳٦۳	۲/٤٤۲	۲/٦٤۷	۲/۳٤۳
۲۵	۲/۹۸۱	۲/۹۹٤	۳/۱۲٤	۳/٤٦۲	۲/۹۷۱



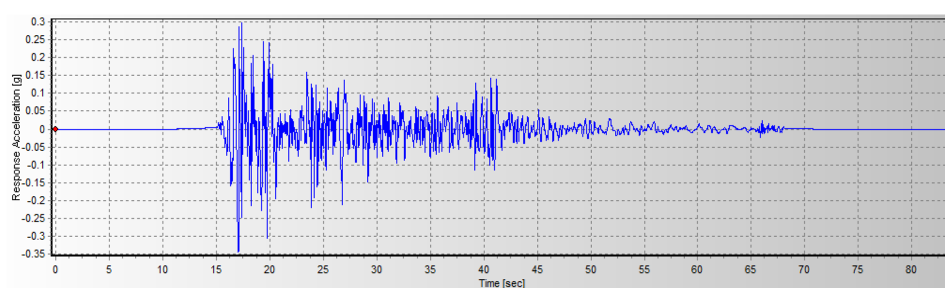
شکل ۱۰ نمودار نسبت‌های $\frac{\bar{T}}{T}$ برای خاک‌های معرفی‌شده در سرعت‌های موج برشی مختلف بر اساس روابط آیین‌نامه‌ی NHERP

جدول ۸ مقایسه‌ی ۱۲ پریود اول سازه‌ی ۱۵ طبقه در دو حالت با تأثیر اندرکنش خاک–سازه و بدون آن

مود	نوع خاک در حالت پایه انعطاف پذیر				در حالت پایه گیردار
	I	II	III	IV	
۱	۱/٦۸۰۵۸۷	۱/٦۹۳۱۳٦	۱/۷۳۹٦۱۲	۱/۸۹۷۸۳۷	۱/٦۸٤٤۳۷
۲	۰/٦۲٦۲۱۳	۰/٦۲٦٦۸٦	۰/٦۲۸۷۳	۰/٦۷۱٤۱٦	۰/٦۲۹۱٤۳
۳	۰/۳۵۱۳۳۱	۰/۳۵۱۷۲۳	۰/۳۵۵۸۹۵	۰/٦۰۵۷٦۷	۰/۳۵۳۰۰٦
٤	۰/۲٤٤۳۰۷	۰/۲٤٤٦۲۹	۰/۳۲۳۸۲۹	۰/٤۷٦۳۹۵	۰/۲٤۵۵٤۲
۵	۰/۱۸۰۰۵	۰/۱۸۰۷۳٤	۰/۲٤٦۷۷۵	۰/۳۹۵۰۹٤	۰/۱۸۰۹٤۷
٦	۰/۱۵۳۰٦۸	۰/۱٦۲۹۳۱	۰/۲٤٤۵۹۸	۰/۳۸۱۵۰۲	۰/۱۵۱۳۷۲
۷	۰/۱۳۹۸۰۵	۰/۱٦۲۷٦	۰/۲۱۱۲۰۹	۰/۳۵۷٦۰۷	۰/۱٤۰٦۳٤
۸	۰/۱۲۸۰۱۵	۰/۱۳۹٦۹	۰/۲۰٦۷٤۷	۰/۳۵۰۵۳۷	۰/۱۲۷۵۲۵
۹	۰/۱۱۰۷٦٦	۰/۱۳۰۸۹۲	۰/۱۹٤٤۲٦	۰/۳٤۳۹۲۹	۰/۱۱۱۳٦۲
۱۰	۰/۱۰۷۷۱٤	۰/۱۱٦۱۱٤	۰/۱۸۸۳۹	۰/۳۳٤٦۵	۰/۱۰۷۳۰٤
۱۱	۰/۱۰۵۱۲۵	۰/۱۱۰۹٤٦	۰/۱۸۱٤٦۳	۰/۳۰٦٦۵۵	۰/۱۰٤۸٤۸
۱۲	۰/۰۹۱۰۲۵	۰/۱۰۸٦۸٤	۰/۱۷٦۷۱۵	۰/۳۰۰۸۰٦	۰/۰۹۱۵۳۱

جدول ۹ مشخصات شتاب نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل تاریخچه زمانی

زلزله	سال	بزرگا	نوع خاک (USGS)	ایستگاه	شتاب حداکثر
El Centro	۱۹٤۰	۷	A	El Centro-Imp Vall	۰/۳٤۳٥
Northridge	۱۹۹٤	٦/۷	A	Topanga	۰/۳۲۸٦
Taft	۱۹٥۲	۷/۲	A	Taft	۰/۱۸٥۲

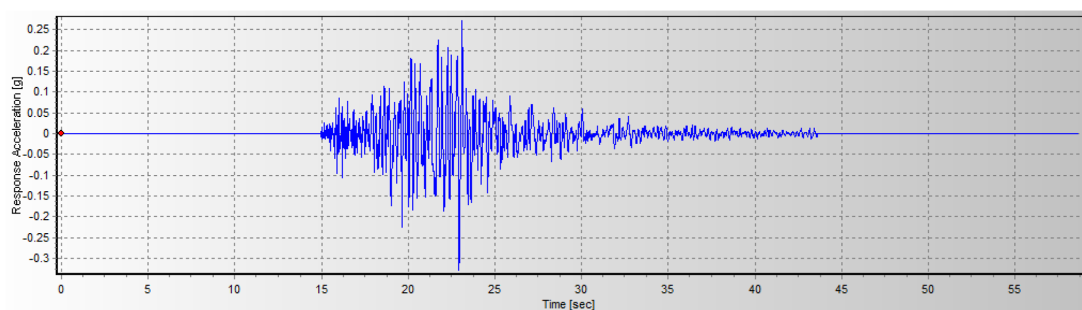


شکل ۱۱ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی El Centro در خاک نوع I

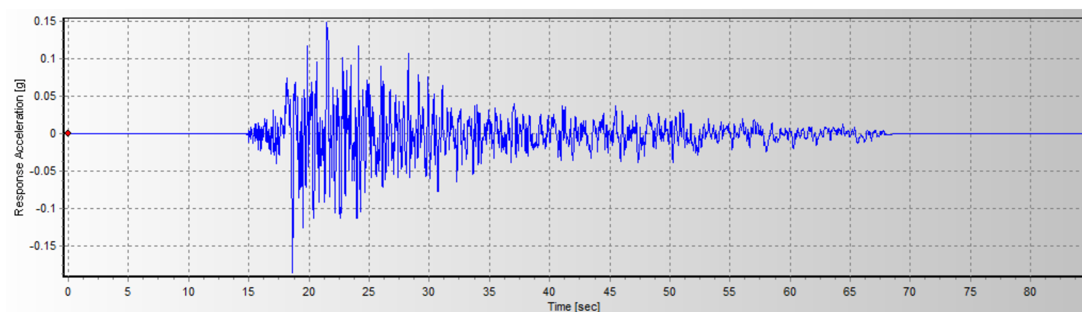
تحلیل تاریخچه زمانی در دو حالت با و بدون اندرکنش خاک-سازه

تحلیل دینامیکی سازه با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان در تراز پایه ساختمان و با بارگیری محاسبات متعارف دینامیک سازه انجام شد. شتاب زمین بر اساس شتاب نگاشت‌های ذکر شده در جدول (۹) تعیین گردید. این تحلیل برای تعیین بازتاب‌ها در هر مقطع زمانی در مدت وقوع زلزله در زمانی که سازه در تراز پایه تحت تأثیر شتاب‌های ناشی از حرکت زمین باشد، انجام می‌شود. در این روش بازتاب‌های دینامیکی سازه که تابعی از زمان است، به وسیله‌ی انتگرال‌گیری معادله‌ی حرکت سازه محاسبه می‌شود. شتاب نگاشته‌ای مورد استفاده براساس ضوابط آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ مقیاس گردید. برای تحلیل سیستم‌ها، از زلزله‌های مشخص‌شده در جدول (۹) که همگی مربوط به خاک نوع یک می‌باشد، استفاده شده است.

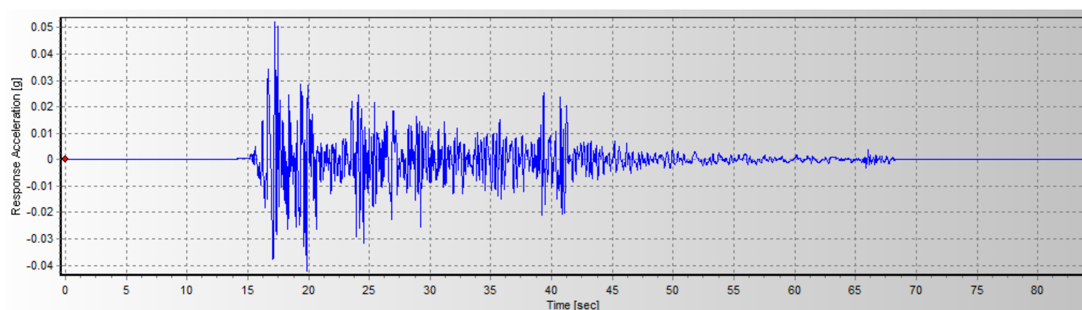
علت انتخاب خاک نوع یک اینست که برای تحلیل سیستم‌های خاک-سازه شتاب نگاشت‌ها به بستر سنگی اعمال می‌شود و سنگ بستر نیز در واقع از جنس خاک نوع یک می‌باشد. این شتاب نگاشت‌ها هنگام عبور از خاک زیر سازه، بر حسب نوع خاک فیلتر می‌شود و به پایه‌ی سازه اعمال می‌شود. برای قاب‌های پایه صلب واقع بر خاک‌های مورد بررسی شتاب نگاشت‌های فیلترشده که در میدان آزاد زمین ثبت شده است، استفاده می‌شود. عمل فیلترینگ شتاب نگاشت‌ها توسط نرم‌افزار Shake انجام شد [3]. ضریب اصلاح برای تمامی سیستم‌های اندرکنش خاک-سازه بر اساس طیف طرح استاندارد خاک نوع یک آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ و زمان تناوب اصلی سیستم خاک-سازه محاسبه شد. اشکال (۱۳-۱۱) شتاب‌نگاشت‌های مربوط به زلزله‌های معرفی‌شده در جدول ۹ می‌باشند و اشکال (۱٦-۱٤) نمونه‌ای از شتاب نگاشت‌های فیلترشده‌ی زلزله‌ی El Centro برای خاک‌های نوع ۲ تا ٤ می‌باشند.



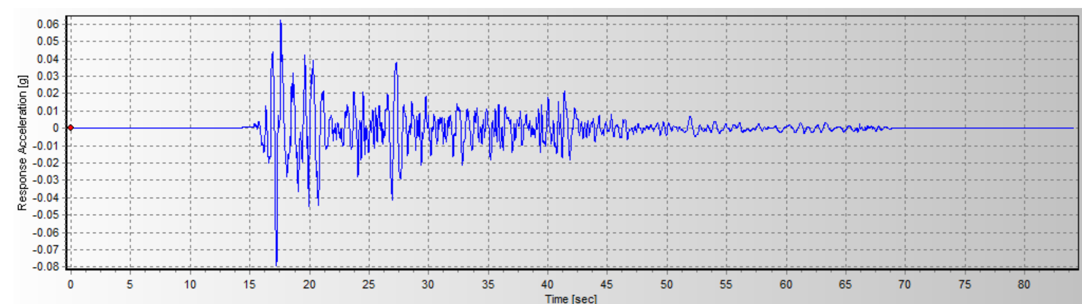
شکل ۱۲ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی Northridge در خاک نوع I



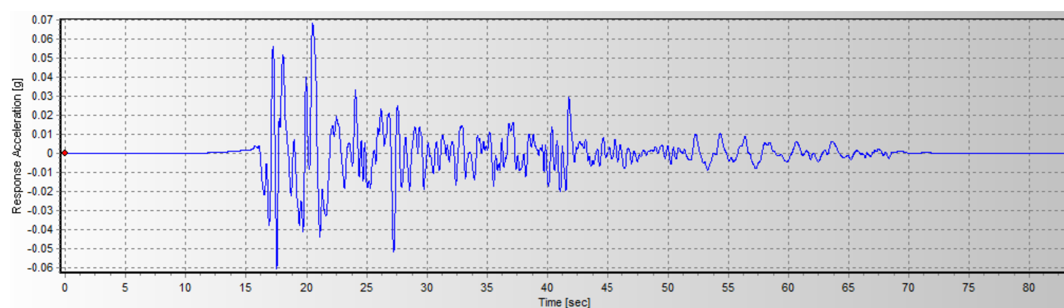
شکل ۱۳ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی Taft در خاک نوع I



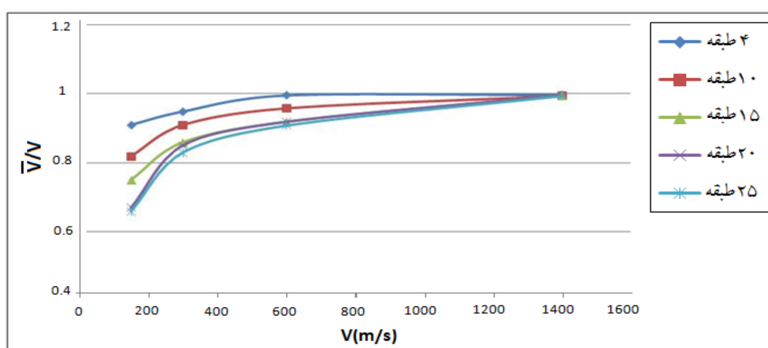
شکل ۱٤ شتاب‌نگاشت فیلترشده‌ی زلزله‌ی El Centro در خاک نوع II



شکل ۱۵ شتاب‌نگاشت فیلترشده‌ی زلزله‌ی El Centro در خاک نوع III



شکل ۱۶ شتاب نگاشت‌فیلترشده زلزله‌ی El Centro در خاک نوع IV



شکل ۱۷ نمودار نسبت‌های $\frac{\bar{V}}{V}$ (برش پایه سازه‌ها) برای خاک‌های معرفی‌شده در سرعت‌های موج برشی مختلف

به‌منظور مقایسه‌ی نیروهای برشی و تغییر مکان‌های طبقات، سازه‌های مورد بررسی در دو حالت بدون در نظر گرفتن اندر کنش خاک-سازه و با در نظر گرفتن آن، تحت اثر زلزله‌های معرفی‌شده تحلیل تاریخچه زمانی شدند و برش پایه‌ی ماکزیمم و تغییر مکان ماکزیمم طبقات برای هر سیستم به‌ترتیب در اشکال (۱۸ و ۱۷) نشان داده شده است. مقایسه‌ی نتایج بین هر سیستم خاک-سازه با تعداد طبقات یکسان و نوع خاک یکسان با سیستم پایه صلب واقع بر همان نوع خاک انجام می‌گیرد. در زیر نمودارهای مربوط به نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی بر سیستم‌های معرفی‌شده نمایش داده شده است. که در آنها

$\bar{U}$: تغییر مکان حداکثر طبقه فوقانی با اندرکنش خاک-سازه

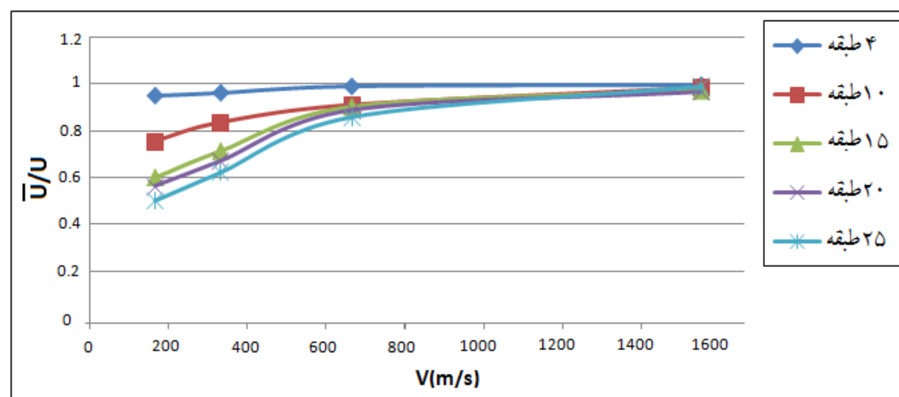
U: تغییر مکان حداکثر طبقه فوقانی بدون اندرکنش خاک-سازه

$\bar{V}$: برش پایه حداکثر با اندرکنش خاک-سازه

V: برش پایه حداکثر بدون اندرکنش خاک-سازه

همان‌طور که در شکل (۱۷) ملاحظه می‌شود، با افزایش ارتفاع سازه میزان تأثیر اندر کنش خاک-سازه افزایش پیدا می‌کند که البته افزایش وزن سازه نیز در افزایش تأثیر اندرکنش خاک-سازه تأثیر بسزایی دارد، به‌عبارت دیگر با افزایش وزن سازه میزان تأثیرات اندر کنش خاک-سازه در پاسخ سازه افزایش پیدا می‌کند.

با توجه به مقادیر $\frac{\bar{V}}{V}$ دریافت می‌شود که اندرکنش خاک-سازه اثر کاهنده بر مقادیر برش پایه دارد و برای سیستم‌های با تعداد طبقات یکسان، با افزایش نرمی خاک، میزان کاهش برش پایه، یعنی اثر اندر کنش خاک-سازه، بیش‌تر خواهد شد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که برای سیستم قرارگرفته بر خاکی با سرعت موج برشی یکسان، با افزایش ارتفاع سازه، تأثیر اندرکنش خاک-سازه بیشتر می‌شود و میزان کاهش برش پایه افزایش می‌شود.



شکل ۱۸ نمودار نسبت‌های $\frac{\bar{u}}{u}$ (تغییر مکان طبقات فوقانی) برای خاک‌های معرفی‌شده در سرعت‌های موج برشی مختلف

با توجه به مقادیر $\frac{\bar{U}}{U}$ در شکل (۱۸) دریافت می‌شود که اندرکنش خاک–سازه، اثر کاهنده بر مقادیر تغییرمکان دارد و برای سیستم‌های با تعداد طبقات یکسان، با افزایش نرمی خاک (کاهش سرعت موج برشی) میزان این تأثیرات افزایش می‌یابد. این امر مربوط به کاهش نیروی برشی پایه‌ی ناشی از اندرکنش خاک–سازه در سیستم‌های فوق می‌باشد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که برای یک سیستم خاک با سرعت موج برشی یکسان با افزایش ارتفاع سازه و به طبع آن با افزایش وزن سازه تأثیر اندرکنش خاک–سازه بیش‌تر می‌شود و میزان کاهش تغییر مکان افزایش می‌شود.

با توجه به دو نمودار فوق مشاهده می‌شود که شدت روند کاهش نسبت‌های برش پایه و تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی برای سازه‌های ۲۰ و ۲۵ طبقه کم‌تر از میزان آن برای سایر سازه‌ها می‌باشد که دلیل آن وجود حرکت گهواره‌ای زیاد در سازه‌های مرتفع می‌باشد.

نتیجه گیری

در این مطالعه تلاش شده‌است تا روشی بر پایه‌ی المان‌های محدود به‌منظور اعمال تأثیرات اندرکنش خاک و سازه برای سازه‌های متداول پیشنهاد شود. این مدل بدون هیچ‌گونه محدودیتی برای انواع سازه‌ها با خصوصیات سازه‌ای متفاوت از جمله ارتفاع سازه، تعداد طبقات سازه، نوع سازه‌ی به‌کار رفته، نوع خاک زیر سازه، بارگذاری و نوع تحلیل به‌کار رفته با ضوابط و پارامترهای آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ قابل استفاده می‌باشد.

تأثیرات شرایط مختلف خاک زیر سازه با سرعت‌های موج برشی متفاوت بر قاب‌های بتنی با ارتفاع و تعداد طبقات متفاوت تحت تأثیر سه زمین‌لرزه‌ی معرفی‌شده مطابق با پارامترها و ضوابط نامه‌ی ۲۸۰۰ مورد مطالعه قرار گرفت و تأثیرات در نظرگرفتن اندرکنش خاک و سازه در تغییر مکان‌های جانبی سازه، برش پایه و پریود ارتعاشی سازه خصوصاً در مورد پریودهای ارتعاشی بالاتر سازه در جداول و نمودارها ارائه شد و در مورد این نتایج بحث شد.

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل مودال قاب‌های مورد بررسی برای مد ارتعاشی پایه سازه با نتایج به‌دست‌آمده از روش بیان‌شده در آیین‌نامه‌ی NEHRP مقایسه شد و هم‌چنین ضرورت در نظر گرفتن مودهای ارتعاشی بالاتر سازه که از ویژگی‌های اساسی این روش می‌باشد بررسی شد.

به‌منظور ارزیابی دقت روش پیشنهادشده در زمینه‌ی تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، این روش با سه روش المان‌های مرزی BEM، روش ترکیبی المان‌های محدود و المان‌های نامحدود و روش مخروطی Cone مقایسه شد و نتایج آن توسط نمودارها

و جداول مربوطه ارائه شد که نشان‌دهنده‌ی دقت کافی مدل پیشنهادشده می‌باشد.
مشاهده می‌شود که نسبت‌های $\frac{\bar{U}}{U}$ برای سازه‌ی ۲۵ طبقه همـواره بـزرگ‌تـر از نسـبت‌هـای $\frac{\bar{V}}{V}$ بـه خصـوص در خاک‌های با سرعت موج برشی کم‌تر است. این افزایش به‌خاطر اثر حرکـت گهـواره‌ای و اثـر حرکـت انتقـالی فونداسیون می‌باشد.

مراجع

1. Mihailo, D.T., Maria, I.T., Tzong-Ying, "Full-scale experimental studies of soil–structure interaction", the 2nd US– Japan workshop on soil–structure interaction, Tsukuba City, Japan, March 6–8, (2001).
2. Whitman, R.V., Richart, F.E., "Design procedures for dynamically loaded foundations", ASCE *Journal of Soil Mechanics*, pp. 169–193, (1967).
3. Lysmer, J., Seed, H.B., "SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites", Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report No. EERC 72–12, (1972).
4. Kasel, E., Roessel, J.M., "Dynamic stiffness and circular foundation", *ASCE Journal of Soil Mechanics*, pp. 771–785, (1975).
5. Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.F., Seed, H.B., "Flush- a computer program for approximate 3D analysis of soil-structure interaction problems", Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report No. EERC 75–30, (1975).
6. Gupta, S., Penzien, J., Lin, T.W., and Yeh, C.S., "Three-dimensional hybrid modeling of soil-structure interaction", CS Earthquake Engineering structure Dynamic, Vol 10, No 1, Jan-Feb, (1982).
7. Bazan, E., Bielak, J., "Three dimensional seismic response of building-foundation systems ", U.S. Geological Survey, Proceedings UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, California, September, (1998).
8. Wilson, E.L., "SAP2000 integrated finite element analysis and design of structures", Computers and Structures Inc., Berkeley, California, (1997).
9. Rodrigues, M.E., Montes, R., "Seismic response and damage analysis of buildings supported on the flexible soil", Earthquake Engineering structure Dynamic, No. 29, (2000).
10. Yerli, H.R., Temel, B., Kiral, E., "Transient infinite elements for 2-dimensional soil-structure interaction analysis", Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 124(10): 976-88, (1998).
11. Tanrikulu, A.H., Yerli, H.R., Tanrikulu, A.K., "Application of multi-region boundary element method to dynamic soil structure-interaction analysis", *Journal of computer and geotechnics*,

Elsevier, 9 Nov, (2001).

12. Jaya, K.P., Prasad, M.A., "Embedded foundation in layered soil under dynamic excitations", Soil Dynamic Earthquake Engineering, (2002).
13. Wolf, J.P., Song, C., "Some cornerstones of dynamic soil–structure interaction", Engineering Structures, Vol. 24, 13-28, (2002).
14. "NEHRP Recommend ended provisions for seismic regulations for new building", Washington, Part I, Building seismic safety council (BSSC), (2003).
15. Yerli, H.R., Kacin, S., "A parallel finite–infinite element model for two-dimensional soil–structure interaction problems", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 23, pp. 249–253, (2003),
16. Wolf, J.P., Deeks, J., "Foundation vibration analysis: A strength-of-materials approach", Oxford, UK, Elsevier Science, Ltd., (2004),
17. Hosseinzadeh, N.A., Nateghi, F., "Shake table study on soil-foundation-structure interaction effects", International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), (2004).
18. "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (3rd Edition), Standard No. 2800-05", Building and Housing Research Center of Iran (BHRC), (2005).
19. Hong, J.L., Jian, L., "Analysis of Soil-Structure Interaction with Finite Element Method", *journal of Key Engineering Materials*, pp. 340-341, (2007).
20. Nasser, M., "Seismic response of RC frames considering dynamic soil-structure interaction", 18th International Conference on the Application of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering ,Germany, 07–09 July,(2009).
21. Mohasseb, S., Abdollahi, B., "Soil – structure interaction analysis using cone model", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE)*, (2009).